

高功率涡旋光束产生方法研究进展

孙喜博¹, 朱启华^{1,2}, 刘兰琴¹, 黄晚晴¹, 张颖¹, 王文义¹, 耿远超^{1*}

¹中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621900;

²中国工程物理研究院等离子体物理重点实验室, 四川 绵阳 621900

摘要 涡旋光束因其特殊的空间结构,在光通信、光与物质相互作用、激光加工等领域具有广阔的应用前景,对揭示极端强场条件下的原子物理新现象、新效应等具有重要的意义,同时有望为控制物理系统带来新的方法。对近年来国内外高功率涡旋光束的主要产生方法的研究进展进行了调研,对每种方法的原理进行了简要介绍,并对各个方法的优势与不足进行了对比分析,针对个别问题提出了相应的改进设想。

关键词 衍射; 涡旋光束; 高功率激光技术; 腔内光束整形

中图分类号 O436 **文献标识码** A

doi: 10.3788/LOP54.070001

Research Progress of Generation Methods of High-Power Vortex Beams

Sun Xibo¹, Zhu Qihua^{1,2}, Liu Lanqin¹, Huang Wanqing¹, Zhang Ying¹,
Wang Wenyi¹, Geng Yuanchao^{1*}

¹Research Center of Laser Fusion, China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China;

²Science and Technology on Plasma Physics Laboratory, China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China

Abstract Vortex beams have wide application prospects in optical communications, interaction with matters and laser processing owing to their special spatial structures, have great significance in the discovery of new phenomena and effect of atomic physics in the extremely intense field, and can bring new methods of controlling physical systems. The main generation methods of high power vortex beams in recent years at home and abroad are summarized, and their principles are introduced briefly. The advantages and disadvantages of each method are analyzed, and some suggestions for improvement are proposed.

Key words diffraction; vortex beams; high power laser technology; intra-cavity beam shaping

OCIS codes 050.1940; 050.4865; 140.3300

1 引言

随着激光技术的发展,一种相位及光强呈特殊分布的光束被发现。1974年Nye等^[1]深入报道了对光束相位奇异性的研究,实验发现了一种具有连续螺旋状相位分布的光束,光束的中心为相位奇异点,中心光强始终为零。1989年Couillet等^[2]根据螺旋相位波与超流漩涡之间的数学相似性,提出了光学涡旋的概念,用

收稿日期: 2017-01-19; **收到修改稿日期:** 2017-03-01

基金项目: 中国工程物理研究院科学技术发展基金(2014A0401018)、等离子体物理重点实验室基金(9140C680604150C68299)

作者简介: 孙喜博(1991—),女,硕士研究生,主要从事光学涡旋及高功率激光技术方面的研究。

E-mail: 279077209@qq.com

导师简介: 朱启华(1969—),男,博士,研究员,主要从事先进激光技术及超短脉冲激光器方面的研究。

E-mail: qihzh@163.com

* **通信联系人.** E-mail: gengyuanchao@caep.cn

以描述这种携带相位奇异性且围绕奇点旋流的波。1992年 Allen 等^[3]指出因涡旋光束的波前呈螺旋形,其波矢量具有环向分量,使得涡旋光束绕着涡旋中心旋转,从而使光束携带轨道角动量。

涡旋光束凭借其独特的相位分布和携带轨道角动量的特性,成为近年来的研究热点^[4-7]。国内外已有很多课题组对涡旋光束的产生方式^[8-10]与传输特性^[11-14]开展了相关研究。涡旋光束在许多领域都具有重要的应用价值,主要表现在以下几方面:1) 涡旋光束具有轨道角动量,用于自由空间光通信时具有更多的通信维度^[15-16],从而可大幅提高通信速度与通信容量;2) 涡旋光束具有中空且具有轨道角动量的特性,可以用于捕获、引导、旋转和吸收粒子^[17-19];3) 带有偏振态分布的涡旋光束可以用于激光加工和材料处理^[20]等。

光与物质的相互作用是人类探索微观物质结构及运动规律的重要手段。在非相对论领域,基于激光与物质相互作用进行的相关科学研究已经较为成熟^[21-24]。随着高粒子流量密度材料的发展,超高功率激光脉冲的产生使得基于光与物质的相互作用的研究逐步进入相对论研究领域(电磁场功率密度高达 $10^{18} \text{ W}\cdot\text{cm}^{-2}$)。目前在相对论领域,具有超高轨道角动量密度和能量密度的涡旋光束能够为光与物质相互作用带来额外的自由度。轨道角动量所产生的力矩为揭示极端强场条件下的原子物理新现象、新效应以及为认识分子、原子及其内部电子的超快运动提供了强有力的技术手段与研究条件,丰富了光与物质相互作用的基本现象,如具有涡旋特性的环形光束与加工表面作用,相比于不具备涡旋特性的环形光束,具有较好的烧蚀表面以及较低的阈值,在纳米量级的微加工^[20,25]与激光消融技术^[26]领域已有初步的应用。此外,涡旋光束的时空特性在高空间时间分辨率检测技术^[27]、打破禁闭跃迁的光谱研究^[28]以及利用高次谐波产生极紫外涡旋光束^[29]等方面有着重要的应用价值,有望为控制物理系统^[30]带来新的方法,从而拓展了涡旋光束的现有应用并使其产生新的应用前景。

本文介绍了腔内光束整形技术以及基于这一技术的高功率涡旋光束产生方法,并对每种方法的优势与不足进行了对比分析,针对个别问题提出了相应的改进设想。

2 腔内光束整形技术介绍

最早科学家们采用腔外光束整形的方法,先利用谐振腔产生放大的高斯光束,然后在谐振腔外通过相位元件进行空间整形,从而实现具有一定功率密度的涡旋光束输出,但这种方式存在集成化低、光场畸变明显以及受环境因素影响严重等问题。

腔内光束整形技术是指在谐振腔内进行空间光束整形,经过放大之后,直接从谐振腔中输出具有一定功率密度的涡旋光束。这种方法可实现涡旋光束的大能量输出,具有集成度高的特点,而且在振荡过程中的模式选择会减小由于相位元件引起的光场畸变,一定程度上解决了腔外光束整形存在的问题。针对不同类别的光束,腔内光束整形技术主要可分为两类:1) 针对腔内信号光的整形技术,通过在原有的高功率激光器系统中加入腔内相位元件来对信号光进行调制整形,以实现高斯模式向涡旋模式的转换输出;2) 针对腔内抽运光的整形技术,通过对抽运光束进行调制整形,使其产生环形增益分布,由此在增益介质中激发出高阶的涡旋模式。

对于腔内信号光整形技术,研究人员设计了许多不同的腔内相位调制元件来实现模式之间的转换^[3,31-33]。1997年 Abramochkin 等^[34]提出了在激光振荡腔内直接产生涡旋激光,通过在环形腔内引入 Dove 棱镜,将激光谐振腔内存在的两种正交的模式进行叠加,产生涡旋光束并对其进行放大,如图 1 所示,这种方法的集成度高,但是会产生多阶涡旋光束,降低了涡旋光束的纯度。2000年 Oron 等^[35]通过将传统

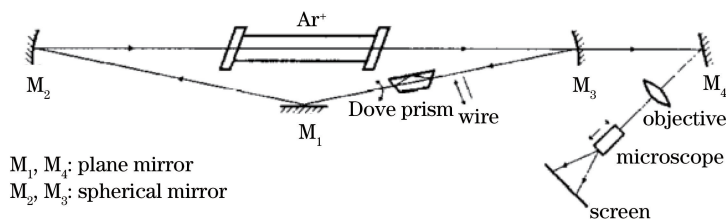


图 1 Dove 环形涡旋激光器^[34]

Fig. 1 Dove annular vortex laser^[34]

固体激光器中的反射镜替换为反射型螺旋相位板来实现模式选择,如图 2 所示,这种方式通过设计已定的相位板,产生了单一频率、高涡旋纯度以及传输稳定的涡旋光束。2005 年 Ishaaya 等^[36]采用腔内相位元件结合被动调 Q 激光器,并将调 Q 开关作为空间滤波器,对高阶涡旋光束进行进一步的选择,实现了高功率高阶涡旋光束的输出。2008 年 Li 等^[37]提出在腔内加入亚波长量级的多层光子晶体光栅实现对模式的选择,在 Nd:YAG 激光器中实现了涡旋光束输出。2010 年 Ito 等^[38]将原有激光器中的反射镜加以改进,通过在反射镜中心设计一个圆形的低反射区来实现腔内模式的选择,获得了环形的拉盖尔-高斯(LG)模式。2011 年 Thirugnanasambandam 等^[39]在腔内加入单轴晶体与球形相差的透镜,实现了涡旋模式的选择输出。2013 年 Ngcobo 等^[40]提出在二极管抽运激光器中加入衍射光学元件(DOE),得到了高纯度的高阶涡旋光束输出。

腔内抽运光束整形技术也受到了研究人员的关注。2005 年 Bisson 等^[41]提出利用小孔的衍射特性产生环形抽运光,从而在 Nd:YAG 激光器中产生了涡旋光束。2014 年 Lin 等^[42]提出将抽运光注入一段空气芯光纤中,实现了环形的光强分布,如图 3 所示。Nd:YAG 中产生了环形的增益区间,可有效地抑制基模产生,并激发高阶涡旋模式的产生。

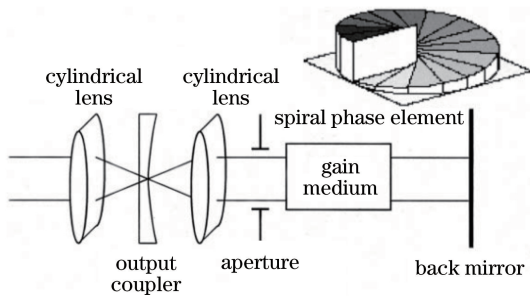


图 2 螺旋相位板涡旋激光器^[35]

Fig. 2 Spiral phase plate vortex laser^[35]

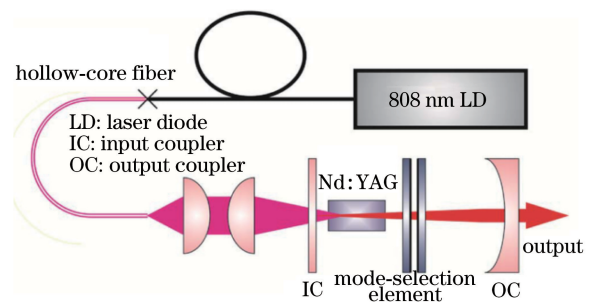


图 3 环形抽运方案^[42]

Fig. 3 Annular pump scheme^[42]

上述腔内整形技术可实现光束质量较高的稳定输出,但是放大斜率效率低,并不能很好地实现高功率涡旋光束的输出。因此,保证高光束质量输出的同时,尽可能地提高涡旋光束的输出功率,是目前高功率涡旋光束研究中需解决的问题。基于腔内整形技术而逐步发展起来的高功率涡旋光束产生方法的研究成为近年来国内外研究学者的关注焦点,下面将主要介绍几种高功率涡旋光束产生方法,并对其原理与优缺点进行简要分析。

3 高功率涡旋光束的产生方法

3.1 基于棒状放大技术的产生方法

2015 年 Li 等^[43]通过理论和实验研究了涡旋光束的 Ho:YAG 棒状放大(RA)技术,如图 4 所示。1932 nm 的抽运光经过单模光纤整形之后,对原子数分数为 1% 的 Ho:YAG 的棒状放大介质进行端面抽运,同时种子光经过相位板生成环形的涡旋光束后,进入放大介质中被放大。2016 年 Li 等^[44]进一步通过理论和实验研究了同心涡旋光束(CVB)的放大,实验模型同样选用 Ho:YAG 的棒状放大器,利用这种棒状放大

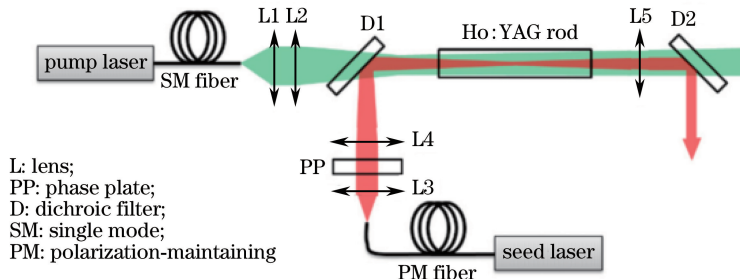


图 4 基于棒状放大技术产生涡旋光束的光路图^[43]

Fig. 4 Light path of vortex beam generation based on rod amplifier^[43]

技术实现了相位分布更为复杂的同心涡旋光束的放大。

棒状放大技术的优点是光路实现简单,具有较大的空间模场面积,可以用于高阶涡旋光束的放大;但由于抽运光与种子光之间的重合度较低,存在放大效率低的问题。因此,需要进一步结合抽运光整形技术,并采用环形抽运光来增大抽运光与环形涡旋光束之间的重合度,从而提高放大效率。在利用棒状放大技术产生高功率涡旋光束时,当功率密度达到 $10^9 \text{ W}\cdot\text{cm}^{-2}$ 时,放大系统的热透镜效应以及大功率条件下的非线性效应会对光束质量带来不可忽略的影响,限制了光功率的进一步提高。

3.2 基于受压光纤放大技术的产生方法

2011年 Koyama 等^[45-46]设计了受压掺镱双包层光纤放大器(PFA),实现了高功率纳秒和皮秒脉冲涡旋光束的输出,如图5所示。在原有的光纤放大器基础上增加压力控制部分,通过夹紧光纤,在与竖直方向呈 45° 的方向上给光纤提供适当的压力,使光纤中两个正交的线偏振(LP)模式存在 $\pi/2$ 或者 $-\pi/2$ 的相位差,将其叠加可产生环形的轨道角动量(OAM)模式。该方法中的模式转换是通过给光纤施加适当的压力来实现的,不需要加入任何用于模式转换的相位元件,大幅提高了系统的稳定性。但是,控制压力产生模式之间的相位差的同时,难以严格控制精度,使得产生的螺旋形波前质量受到一定的影响。

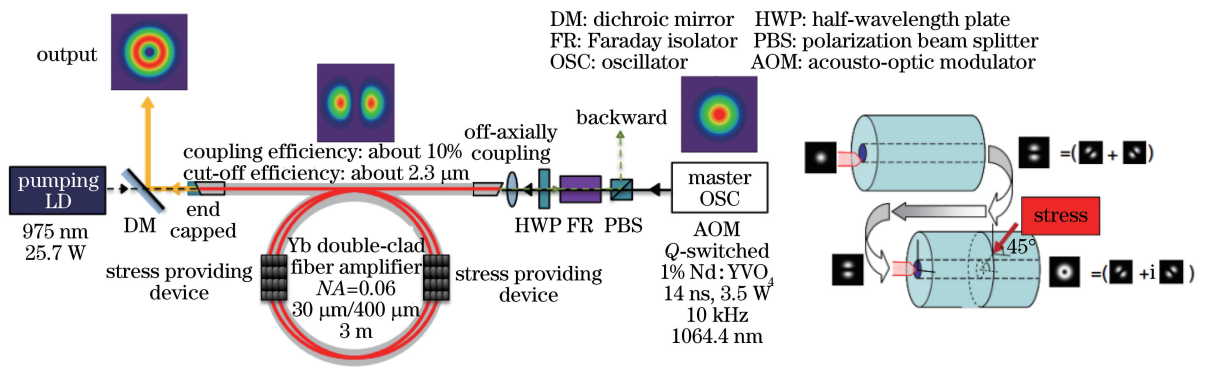


图5 基于受压光纤放大技术产生高功率涡旋光束的光路图^[45]

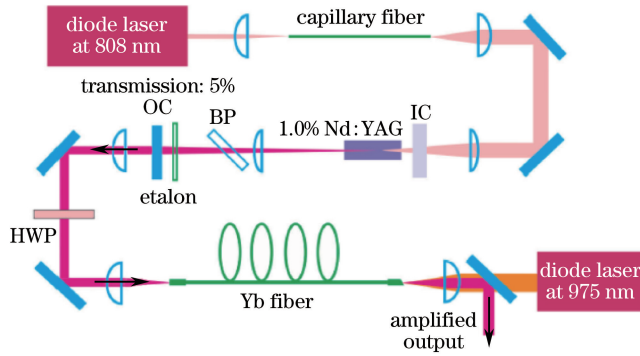
Fig. 5 Light path of high power vortex beam generation based on pressed fiber amplification technology^[45]

针对受压光纤的缺陷,2014年 Lin 等^[47]提出了一种新型光纤布拉格光栅——螺旋光纤布拉格光栅(H-FBGs),光栅技术改变了光纤的空间结构,实现了模式之间的相位差,改善了受压光纤控制精度不高的问题,表现出较大的应用价值。这种光纤光栅中心旋转的非对称折射率调制使横向电场产生 2π 的相位差。基于这种特殊的光纤光栅设计,2016年 Zhang 等^[48]实现了高斯光束与涡旋光束的高效转换,转换效率最高可达90%以上。如果这种光纤能够应用于涡旋光束的放大技术中,将极大程度地提高光束质量,并提高涡旋光束的功率输出。

3.3 基于主振荡光功率放大技术的产生方法

2014年 Kim 等^[49]利用主振荡光功率放大(MOPA)技术,在谐振腔中产生高光束质量的拉盖尔-高斯(LG)光束,并将 LG 光束耦合进入多模掺镱光纤中,对其进行传输放大,实现了斜率效率为59%、功率为10.7 W、光束质量 $M^2=2.1$ 的1064nm 涡旋光束连续输出。

该课题组所设计的高功率 MOPA 系统主要包括 Nd:YAG 主振荡器和一个多模掺镱光纤放大器,如图6所示。实验中为了更好地得到一阶 LG 光束,采用了抽运光限制技术,利用毛细管状光纤产生808nm 的环形光束,并以此作为谐振腔的抽运光对 Nd:YAG 晶体进行端面抽运。抽运光环形的增益分布可有效地抑制基模的产生,使高阶 LG 光束得到了放大。通过在谐振腔中放置了一个标准具和一个布儒斯特片(BP),实现了对 LG 模式螺旋波前的调控。通过调整标准具的倾斜角度来改变波前的涡旋方向(即轨道角动量的符号)。谐振腔输出的 LG 模式的光束通过空间耦合进入975nm 端面抽运的双包层保偏大模场光纤,并得到进一步放大。由于光束质量取决于主振荡的输出,而不是对光纤施加的弯曲压力,因此相比于传统的光纤放大,该方法所实现的放大的涡旋光束具有更高的光束质量;但是空间耦合容易使 LG 模式与光纤增益区间失配,从而导致光纤放大的斜率效率受到影响。

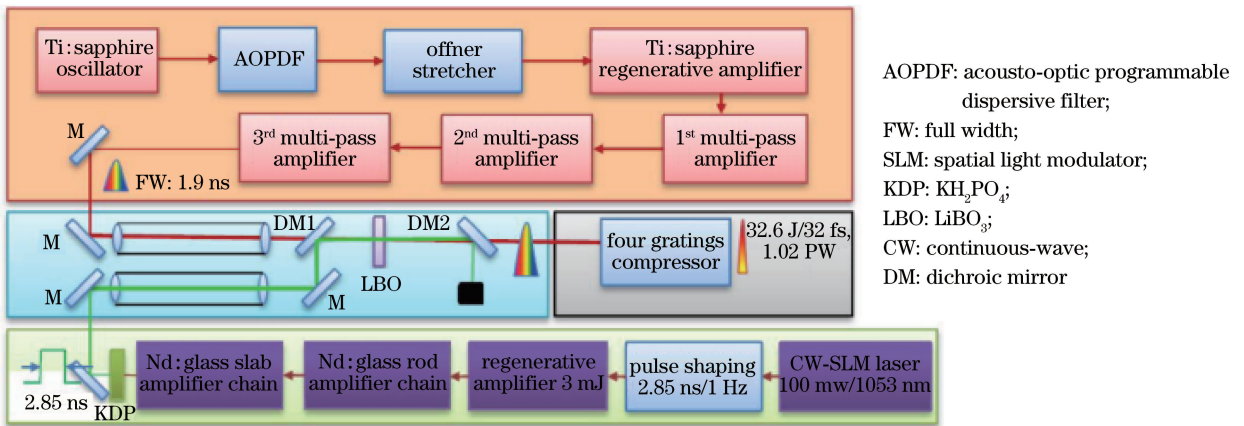
图 6 基于 MOPA 技术产生高功率涡旋光束的光路图^[49]Fig. 6 Light path of high power vortex beam generation based on MOPA technology^[49]

3.4 基于光参量啁啾脉冲放大技术的产生方法

目前,已有很多关于涡旋光束的非线性频率转换技术(如二次谐波^[50-51]、和频^[52]、光参量振荡^[53]以及参量下转换^[54])方面的理论分析和实验研究。2016年 Yu 等^[55]提出了 LG 涡旋光束的非共线光参量啁啾脉冲放大(OPCPA)技术,并进行了数值研究。图 7 为 OPCPA 技术原理图,通过对时间与空间的走离效应、群速度色散与衍射等多方面因素的分析,从理论上为涡旋光束的非共线 OPCPA 过程建立了较为完整的分析模型。

仿真结果表明 OPCPA 技术具有很大的频率调谐范围及很好的宽带放大能力。相比于传统的高功率激光放大器(如钕玻璃、掺钛蓝宝石等),参量过程中大的单程增益可减小涡旋光束在传输过程产生的光场畸变,并且通过控制抽运光的能量等参数可以实现对 LG 涡旋光束的失真补偿。

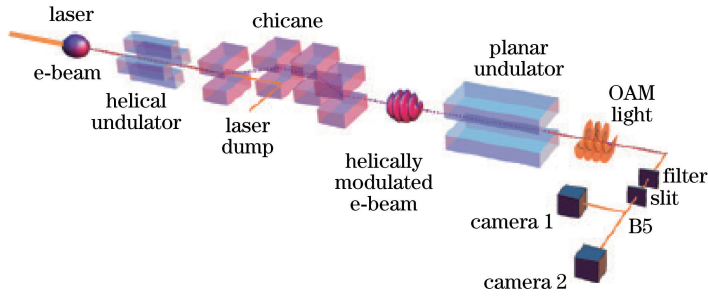
相比于高斯光束的 OPCPA,涡旋光束的 OPCPA 过程由于存在较大的横向相位失配,转换效率明显降低。使用非线性晶体作为转换介质时,功率密度可达到 $10^9 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$,由 B 积分增长带来的相位积累或者高重复频率带来的热效应严重影响了涡旋光束的 OPCPA 过程中光束质量以及输出功率的提高。

图 7 基于 OPCPA 技术产生高功率涡旋光束的光路图^[55]Fig. 7 Light path of high power vortex beam generation based on OPCPA technology^[55]

3.5 基于自由电子激光技术(FEL)的产生方法

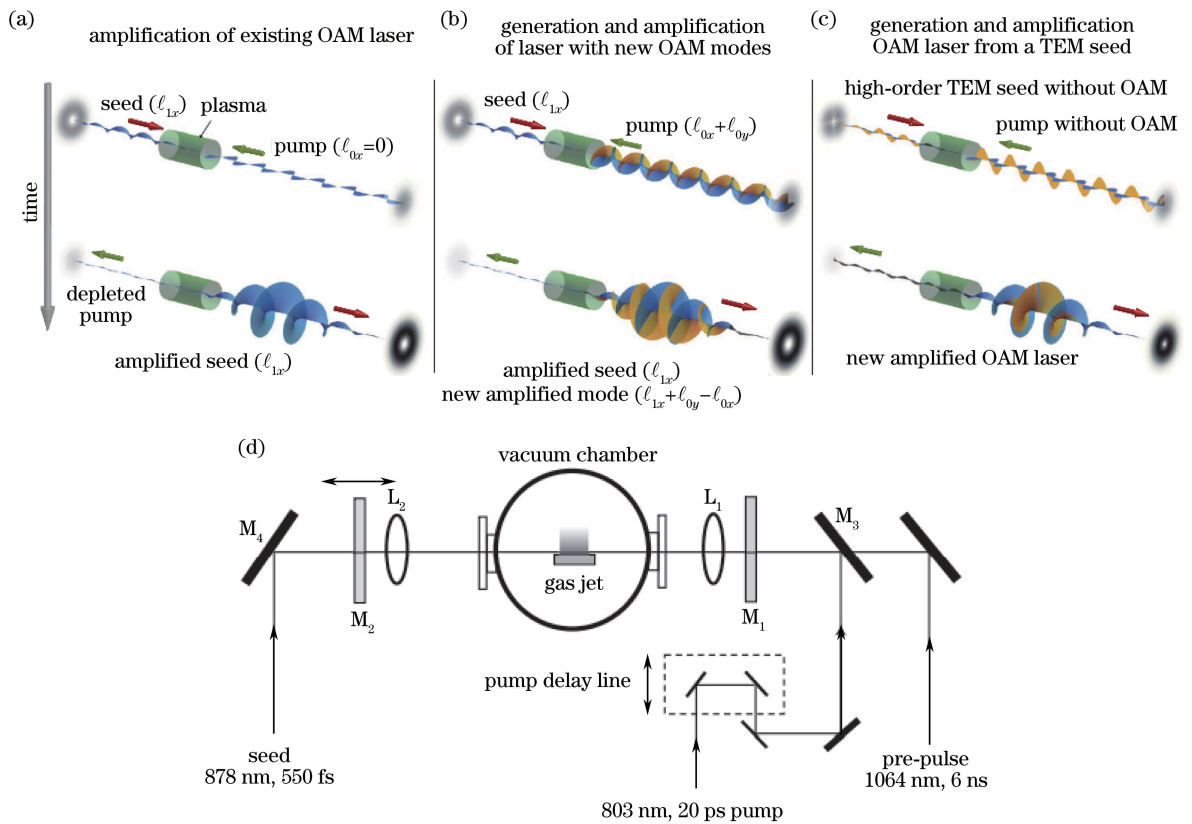
2013年 Bar-David 等^[56]在自由电子激光器中将相对论电子束用作模式转换器,实现了高斯光束与 OAM 模式的有效转换,如图 8 所示。激光与电子束同时进入螺旋调制器中,使电子产生涡旋能量分布;二者再经电磁调制弯道,使电子的涡旋能量分布转换为涡旋密度分布。在二维调制器中,激光和螺旋调制电子束的相互作用可产生具有轨道角动量的涡旋光束。

将自由电子作为激光介质,通过精确操控电子分布,从而可对散射光的时空结构进行细致的调控。利用这种技术能够产生高强度、波长范围为硬 X 射线的涡旋光束,但螺旋结构的束内散射会极大地影响产生的涡旋光束质量。

图 8 基于 FEL 产生高功率涡旋光束的光路图^[56]Fig. 8 Light path of high power vortex beam generation based on FEL^[56]

3.6 基于受激拉曼背向散射放大技术的产生方法

2016 年 Vieira 等^[57]采用三维数值模拟方法(PIC),对等离子体中受激拉曼放大(SRA)产生高功率涡旋光束的二阶非线性光学过程进行了仿真模拟,原理如图 9 所示。

图 9 基于受激拉曼背向散射放大技术产生高功率涡旋光束的原理图^[57]。(a) 现有 OAM 激光的放大；

(b) 具有新 OAM 模式的激光的产生和放大；(c) 具有新 OAM 模式的激光的产生和放大；(d) 涡旋光束的 SRA

Fig. 9 Principle of high power vortex beam generation based on SRA^[57]. (a) Amplification of existing OAM laser;

(b) generation and amplification of laser with new OAM modes; (c) generation and amplification of OAM laser from a TEM seed; (d) SRA of vortex beams

仿真结果表明,不同类型的种子光与抽运光相互作用时能够产生不同的放大效果:1) 种子光为涡旋光束且抽运光为高斯光束时,能够实现种子光的放大,这一过程不会改变种子光的涡旋特性;2) 种子光和抽运光均为涡旋光束时,能够在对种子光进行放大的同时,产生并放大具有新的涡旋特性的光束;3) 种子光为不具有涡旋特性的高阶横电磁(TEM)模式且抽运光为高斯光束时,可以产生并放大具有涡旋特性的光束。

基于等离子体的受激拉曼背向散射技术产生高功率涡旋光束的方法适用于各种阶次的涡旋光束,但是受激拉曼散射(SRS)对于实验参数的波动很敏感,而且需要实现抽运光与种子光之间精确的频率匹配。

3.7 基于受激布里渊放大技术的产生方法

2015年 Gao 等^[58]利用受激布里渊放大(SBA)技术对 OAM 光束进行放大,分别在共线与不共线的系统中,得到了光-声的能量转换效率以及放大信号的相位分布,如图 10 所示。图中 k_{pump} 和 k_{Stokes} 分别为抽运光和斯托克斯光的波矢量。

实验中采用倍频调 Q 的 Nd:YAG 激光器,激光器输出脉冲宽度为 12 ns、重复频率为 1 Hz 的线偏振高斯脉冲,输出脉冲经过偏振分束器分为两部分:一部分光用于激光抽运;另一部分光经过受激布里渊散射(SBS)后产生斯托克斯光,斯托克斯光再经螺旋相位板(SPP)后产生涡旋的斯托克斯光,将涡旋的斯托克斯光作为信号光。两束光共同作用于布里渊放大器(BA),实现涡旋光信号的放大,涡旋信号光能量为 10^{-12} J 时放大因子达到 10^9 。研究表明,OAM 信号能够被有效放大,并且不会引入明显的噪声,输出信号的模式与抽运光模式和几何构型无关。

涡旋光束 SBA 技术的优势在于:与激光放大器和光参量振荡技术相比,噪声较小,而且不需要额外的抽运光源。但是,由于 SBA 过程中的种子源产生于信号噪声,产生的时刻存在阈值特性,以此带来的时间抖动会使得 SBA 的时间特性不稳定,进而对放大效率产生影响。通过电子学系统实现精确的时间同步,尽可能地提升转换效率,从而可以解决上述问题。

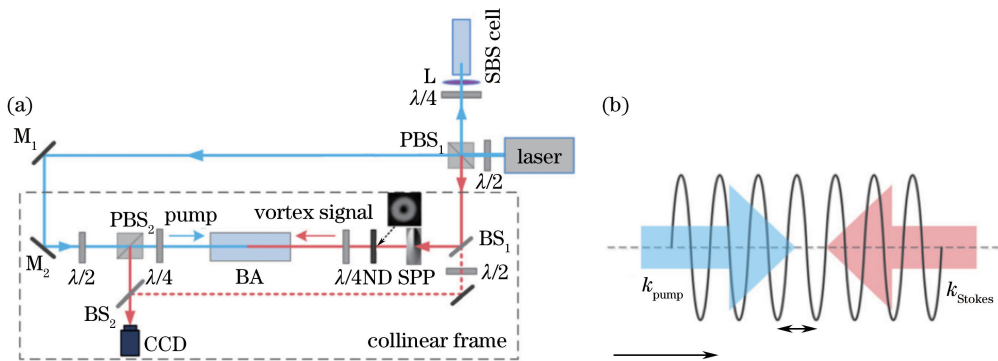


图 10 基于 SBA 技术产生高功率涡旋光束的(a)光路图和(b)原理图^[58]

Fig. 10 (a) Light path figure and (b) diagram of generation of high power vortex beams based on SBA technology^[58]

4 分 析

基于以上调研,对目前常见的几种产生高功率涡旋光束方法的优势与不足进行对比分析,并针对部分产生高功率涡旋光束的方法提出了相应的改进设想,如表 1 所示。

产生高功率涡旋光束的方法主要通过结合现有的高功率激光放大技术与腔内光束整形技术来实现涡旋光束的高功率输出。不同高功率涡旋光束的产生方法具有不同的优缺点,可根据实际情况选择合适的产生方法。尽可能地增大涡旋光束的输出功率、提高光束质量和提升系统的稳定性是目前研究高功率涡旋光束产生方法需要解决的问题。

基于棒状放大技术的产生方法具有实现简单、放大斜率效率高等特点,但是放大过程中存在强烈的热透镜效应以及非线性效应,由于相位板对于涡旋光束的波长较为敏感,短脉冲的涡旋光束色散会影响光束质量,因此该方法不适用于宽带涡旋光束的放大。

基于受压光纤放大技术的产生方法具有较好的系统稳定性以及紧凑的结构,但是利用压力实现模式转换时模式转换效率比较低,而且难以实现精准的相位调控,从而降低了光束的输出质量。使用涡旋布拉格光栅能够在一定程度上提高转换效率和光束质量。光纤放大技术对于波长没有特殊的要求,因此可以应用于短脉冲涡旋光束的放大;但是,对于飞秒量级的脉冲,需要进一步考虑色散的影响。

基于主振荡光功率放大技术产生的涡旋光束的光束质量较高,但是空间耦合影响了放大的斜率效率,因此这种方式并不适用于宽带涡旋光束的放大。

基于光参量振荡放大技术的产生方法具有较大的频率调谐范围以及较好的宽带放大能力,但是放大过

程中存在不可避免的强热透镜效应以及非线性效应。

基于自由电子激光技术的产生方法能够实现波长范围为硬 X 射线的涡旋光束的输出,但是放大过程中的光束散射带来的有害影响制约了光束质量的提升。

基于受激拉曼放大技术的产生方法具有较大的灵活性,而且可实现很高的功率输出;但这种方式需要精确的相位匹配,且输出不稳定。

基于受激布里渊放大技术的产生方式具有较好的应用前景,这种方式具有较低的噪声,而且不需要额外的抽运源,输出较为稳定。此外,布里渊声光耦合是一种基于声-光相互作用的三阶非线性光学过程,无论从经典还是量子角度都为光束操控提供了更多的自由度,可以很好地应用于光纤或者芯片集成光电。除了信号放大,涡旋光的 SBA 可以利用对介质的远程相互作用(光学力矩)来激发涡旋声子。激发的声子的轨道角动量随着光学力矩的改变而改变,通过改变 SBA 的几何构型或者光束的轨道角动量可以影响光学力矩的大小,这一力学特性将会在轨道角动量复用尤其是信息处理方面有很大的发展前景。

表 1 高功率涡旋光束产生方法的对比分析

Table 1 Comparison of different methods for high power vortex beam generation

Generation method	Advantage	Disadvantage	Improvement
RA	Easy to be implemented, high slope efficiency	Strong thermal lensing effect, strong nonlinear effect	Using pump wave with annular distribution
PFA	Relative stability, compact structure	Low conversion efficiency, low precision of phase modulation, low beam quality	Using helical fiber Bragg gratings to improve conversion efficiency and beam quality
MOPA	High beam quality, unique reliability	Low slope efficiency caused by spatial coupling	
OPCPA	Wide frequency tunability, broadband amplification ability	Strong thermal lensing effect, strong nonlinear effect	
FEL	Hard X-ray wavelengths	Deleterious effects of intra-beam scattering	
SRA	Allow for greater flexibility, output with high powers and intensities	Instability of output, need for precise frequency matching	
SBA	More degrees of freedom of signal manipulating, low noise level, no requiring extra pump sources, relative stability	Self-SBS noise of pump in collinear frame, instability of temporal characteristic	Using noncollinear frame with small crossing angle, using electronic systems to realize precise pulse synchronization

采用相位调制光学元件容易实现涡旋光束的模式转换,但是空间光学元件产生的热透镜效应以及非线性效应随着功率密度的增加($10^9 \text{ W}\cdot\text{cm}^{-2}$)愈发明显,其带来的不利影响不容忽视。进一步提高涡旋光束功率时,需要考虑减少空间相位调制元件的使用。全光纤系统具有较好的热管理,同时能保证大的增益以及很高的光束质量,是高功率涡旋光束产生方法的主要发展方向之一。

利用光-光相互作用的二阶非线性光学过程和声-光相互作用的三阶非线性光学过程可以实现涡旋光束的高功率、高质量输出,同时由于放大介质是等离子体或者气体,因此不存在损伤阈值以及热透镜效应的制约,也是高功率涡旋光束产生方法的主要发展方向之一。

5 结 论

高功率涡旋光束具有独特的性质,具有很大的应用前景与发展潜力,如何获得高功率涡旋光束引起越来越多的研究人员的注意。通过对近年来国内外高功率涡旋光束的主要产生方法的研究进展进行调研总结,对每种方法的原理进行简要的介绍,并对各个方法的优势与不足进行了对比分析,针对个别问题提出了相应的改进设想。高功率涡旋光束将在许多领域发挥重要的作用,以探索发现光与物质相互作用的新现象。

参 考 文 献

- [1] Nye J, Berry M. Dislocations in wave trains[J]. Proceedings of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 1974, 336(1605): 165-190.
- [2] Couillet P, Gil L, Rocca F. Optical vortices[J]. Optics Communications, 1989, 73(5): 403-408.
- [3] Allen L, Beijersbergen M W, Spreeuw R J, *et al.* Orbital angular momentum of light and the transformation of Laguerre-Gaussian laser modes[J]. Physical Review A, 1992, 45(11): 8185-8189.
- [4] Yao A M, Padgett M J. Orbital angular momentum: Origins, behavior and applications[J]. Advances in Optics and Photonics, 2011, 3(2): 161-204.
- [5] Kivshar Y S, Ostrovskaya E A. Optical vortices: Folding and twisting waves of light[J]. Optics & Photonics News, 2001, 12(4): 24-28.
- [6] Padgett M J, Courtial J, Allen L J. Light's orbital angular momentum[J]. Physics Today, 2004, 57(5): 35-40.
- [7] Lu Xuanhui, Huang Huiqin, Zhao Chengliang, *et al.* Optical vortex beams and optical vortices[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2008, 45(1): 50-56.
陆璇辉, 黄慧琴, 赵承良, 等. 涡旋光束和光学涡旋[J]. 激光与光电子学进展, 2008, 45(1): 50-56.
- [8] Padgett M J, Allen L. Orbital angular momentum exchange in cylindrical-lens mode converters[J]. Journal of Optics B: Quantum and Semiclassical Optics, 2002, 4(2): S17-S19.
- [9] Smith A V, Armstrong D J. Generation of vortex beams by an image-rotating optical parametric oscillator[J]. Optics Express, 2003, 11(8): 868-873.
- [10] Alexeyev C N, Fridman Y A, Lapin B P, *et al.* Orbital angular momentum control by a multihelicoidal fibre with a twist defect[J]. Journal of Optics, 2013, 15(12): 125401.
- [11] Ramachandran S, Kristensen P. Optical vortices in fiber[J]. Nanophotonics, 2013, 2(5/6): 455-474.
- [12] Sun Xibo, Geng Yuanchao, Liu Lanqin, *et al.* Study on propagation characteristics of optical vortices in bent fibers[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(s1): s106001.
孙喜博, 耿远超, 刘兰琴, 等. 弯曲阶跃型光纤中光学涡旋的传输特性研究[J]. 光学学报, 2015, 35(s1): s106001.
- [13] Belyi V N, Khilo N A, Kurilkina S N, *et al.* Spin-to-orbital angular momentum conversion for Bessel beams propagating along the optical axes of homogeneous uniaxial and biaxial crystals[J]. Journal of Optics, 2013, 15(4): 044018.
- [14] Luo H M, Ren Z, Shu W, *et al.* Reversed propagation dynamics of Laguerre-Gaussian beams in left-handed materials [J]. Physical Review A, 2008, 77(2): 023812.
- [15] Yan Y, Xie G, Lavery M P, *et al.* High-capacity millimetre-wave communications with orbital angular momentum multiplexing[J]. Nature Communications, 2014, 5: 4876.
- [16] Wang J, Willner A. Using orbital angular momentum modes for optical transmission[C]. Optical Fiber Communication Conference, 2014: W4J.5.
- [17] Padgett M J, Bowman R. Tweezers with a twist[J]. Nature Photonics, 2011, 5(6): 343-348.
- [18] Phillips D B, Padgett M J, Hanna S, *et al.* Shape-induced force fields in optical trapping[J]. Nature Photonics, 2014, 8(5): 400-405.
- [19] Grier D G, Roichman Y. Holographic optical trapping[J]. Applied Optics, 2006, 45(5): 880-887.
- [20] Allegre O, Jin Y, Perrie W, *et al.* Complete wavefront and polarization control for ultrashort-pulse laser microprocessing[J]. Optics Express, 2013, 21(18): 21198-21207.
- [21] Shvedov V, Rode A, Izdebskaya Y V, *et al.* Giant optical manipulation[J]. Physical Review Letters, 2010, 105(11): 118103.
- [22] Gahagan K T, Swartzlander G A. Optical vortex trapping of particles[J]. Optics Letters, 1996, 21(11): 827-829.
- [23] Grier D G. A revolution in optical manipulation[J]. Nature, 2003, 424(6950): 810-816.
- [24] Luo Wei, Cheng Shubo, Yuan Zhanzhong, *et al.* Power-exponent-phase vortices for manipulating particles[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(11): 1109001.
罗 伟, 程书博, 袁战忠, 等. 幂指数相位涡旋光束用于微粒操控[J]. 光学学报, 2014, 34(11): 1109001.
- [25] Hnatovsky C, Shvedov V, Krolikowski W, *et al.* Materials processing with a tightly focused femtosecond laser vortex

- pulse[J]. *Optics Letters*, 2010, 35(20): 3417-3419.
- [26] Hamazaki J, Morita R, Chujo K, *et al.* Optical-vortex laser ablation[J]. *Optics Express*, 2010, 18(3): 2144-2151.
- [27] Chaitanya N A, Jabir M V, Samanta G K. Efficient nonlinear generation of high power, higher order, ultrafast “perfect” vortices in green[J]. *Optics Letters*, 2016, 41(7): 1348-1351.
- [28] Picón A, Benseny A, Mompert J, *et al.* Transferring orbital and spin angular momenta of light to atoms[J]. *New Journal of Physics*, 2010, 12(8): 201-206.
- [29] Cheng K, Zhong X, Xiang A. Propagation dynamics, Poynting vector and accelerating vortices of a focused Airy vortex beam[J]. *Optics & Laser Technology*, 2014, 57(7): 77-83.
- [30] Zhang X, Shen B G, Shi Y, *et al.* Generation of intense high-order vortex harmonics[J]. *Physical Review Letters*, 2015, 114(17): 173901.
- [31] Ament C, Johnson L, Schmittsody A, *et al.* Generation of multiterawatt vortex laser beams [J]. *Applied Optics*, 2014, 53(15): 3355-3360.
- [32] Beijersbergen M W, Allen L J, van der Veen H V, *et al.* Astigmatic laser mode converters and transfer of orbital angular momentum[J]. *Optics Communications*, 1993, 96(1/3): 123-132.
- [33] Sola I G, Collados V, Plaja L, *et al.* High power vortex generation with volume phase holograms and non-linear experiments in gases[J]. *Applied Physics B*, 2008, 91(1): 115-118.
- [34] Abramochkin E G, Losevsky N N, Volostnikov V G. Generation of spiral-type laser beams[J]. *Optics Communications*, 1997, 141(1/2): 59-64.
- [35] Oron R, Davidson N, Friesem A A, *et al.* Efficient formation of pure helical laser beams[J]. *Optics Communications*, 2000, 182(1/3): 205-208.
- [36] Ishaaya A A, Davidson N, Friesem A A. Very high-order pure Laguerre-Gaussian mode selection in a passive Q-switched Nd:YAG laser[J]. *Optics Express*, 2005, 13(13): 4952-4962.
- [37] Li J L, Ueda K, Zhong L X, *et al.* Efficient excitations of radially and azimuthally polarized Nd³⁺:YAG ceramic microchip laser by use of subwavelength multilayer concentric gratings composed of Nb₂O₅/SiO₂ [J]. *Optics Express*, 2008, 16(14): 10841-10848.
- [38] Ito A, Kozawa Y, Sato S. Generation of hollow scalar and vector beams using a spot-defect mirror[J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 2010, 27(9): 2072-2077.
- [39] Thirugnanasambandam M P, Senatsky Y, Ueda K. Generation of radially and azimuthally polarized beams in Yb:YAG laser with intra-cavity lens and birefringent crystal[J]. *Optics Express*, 2011, 19(3): 1905-1914.
- [40] Ngcobo S, Aitameur K, Passilly N, *et al.* Exciting higher-order radial Laguerre-Gaussian modes in a diode-pumped solid-state laser resonator[J]. *Applied Optics*, 2013, 52(10): 2093-2101.
- [41] Bisson J F, Senatsky Y, Ueda K. Generation of Laguerre-Gaussian modes in Nd:YAG laser using diffractive optical pumping[J]. *Laser Physics Letters*, 2005, 2(7): 327-333.
- [42] Lin D, Daniel J M O, Clarkson W A. Controlling the handedness of directly excited Laguerre-Gaussian modes in a solid-state laser[J]. *Optics Letters*, 2014, 39(13): 3903-3906.
- [43] Li Y, Zhang Z Y, Miller J K, *et al.* Ho:YAG rod amplifier for vortex beams[C]. *Photonics Conference (IPC)*, 2015: 15600565.
- [44] Li Y, Li W, Zhang Z, *et al.* Concentric vortex beam amplification: Experiment and simulation[J]. *Optics Express*, 2016, 24(2): 1658-1667.
- [45] Koyama M, Hirose T, Okida M, *et al.* Nanosecond vortex laser pulses with millijoule pulse energies from a Yb-doped double-clad fiber power amplifier[J]. *Optics Express*, 2011, 19(15): 14420-14425.
- [46] Koyama M, Hirose T, Okida M, *et al.* Power scaling of a picosecond vortex laser based on a stressed Yb-doped fiber amplifier[J]. *Optics Express*, 2011, 19(2): 994-999.
- [47] Lin Z X, Wang A T, Xu L X, *et al.* Generation of optical vortices using a helical fiber Bragg grating[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2014, 32(11): 2152-2156.
- [48] Zhang X Q, Wang A T, Chen R S, *et al.* Generation and conversion of higher order optical vortices in optical fiber with helical fiber Bragg gratings[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2016, 34(10): 2413-2418.
- [49] Kim D J, Kim J W, Clarkson W A. High-power master-oscillator power-amplifier with optical vortex output [J].

- Applied Physics B, 2014, 117(1): 459-464.
- [50] Courtial J, Dholakia K, Allen L J, *et al.* Second-harmonic generation and the conservation of orbital angular momentum with high-order Laguerre-Gaussian modes[J]. Physical Review A, 1997, 56(5): 4193-4196.
- [51] Koyama M, Shimomura A, Miyamoto K, *et al.* Frequency-doubling of an optical vortex output from a stressed Yb-doped fiber amplifier[J]. Applied Physics B, 2014, 116(2): 249-254.
- [52] Beržanskis A, Matijošius A, Piskarskas A, *et al.* Sum-frequency mixing of optical vortices in nonlinear crystals[J]. Optics Communications, 1998, 150(1/6): 372-380.
- [53] Abulikemu A, Yusufu T, Mamuti R, *et al.* Widely-tunable vortex output from a singly resonant optical parametric oscillator[J]. Optics Express, 2015, 23(14): 18338-18344.
- [54] Huguenin J A O, Martinelli M, Caetano D P, *et al.* Orbital angular momentum exchange in parametric down conversion[J]. Journal of Modern Optics, 2006, 53(5/6): 647-658.
- [55] Yu L H, Liang X Y, Xu L, *et al.* Optimization for high-energy and high-efficiency broadband optical parametric chirped-pulse amplification in LBO near 800 nm[J]. Optics Letters, 2015, 40(14): 3412-3415.
- [56] Bar-David J, Volochbloch N, Mazurski N, *et al.* Unveiling the propagation dynamics of self-accelerating vector beams [J]. Scientific Reports, 2016, 6: 34272.
- [57] Vieira J G H, Trines R M G M, Alves E P, *et al.* Amplification and generation of ultra-intense twisted laser pulses via stimulated Raman scattering[J]. Nature Communications, 2016, 7: 10371.
- [58] Gao W, Mu C Y, Li H W, *et al.* Parametric amplification of orbital angular momentum beams based on light-acoustic interaction[J]. Applied Physics Letters, 2015, 107(4): 041119.